

МЕТРОЛОГІЧНА ПЕРЕВІРКА ШУНТІВ ВИСОКОЇ ТОЧНОСТІ З НОМІНАЛЬНИМ ЗНАЧЕННЯМ ОПОРУ, НЕ КРАТНИМ 10^n

Ó Степаняк М. В., Степаняк М. М., 2016

Розглядається метод підвищення точності та розширення діапазону вимірювань за рахунок зниження нижньої границі, який придатний, зокрема, для перевірки шунтів з малими значеннями опору з номіналами, не кратними 10^n .

Ключові слова: перевірка шунтів, міра електричного опору, вимірювання електричного опору номіналом, не кратним 10^n .

A method for increasing the accuracy and expanding the measurement range by reducing the lower limit suitable particularly for checking shunts with low resistance with nominal values not divisible by 10^n has been considered.

Key words: verification shunts, electrical resistance measure, measuring electrical resistance with the nominal values not divisible by 10^n .

Вступ

Електричний опір на постійному струмі є однією з найпоширеніших вимірювальних величин, причому не тільки у галузі вимірювань електричних величин, але й галузі вимірювання неелектричних величин електричними засобами. Зокрема, під час вимірювання опорів термоперетворювачів та термісторів, тензорезисторів для визначення механічних напружень, сили тиску, переміщень під час вимірювання температури та під час створення вузлів вимірювальної техніки на мікроелектронному рівні. Особливо це важливо в електроенергетиці під час перевірки шунтів [1–5].

Мета роботи – підвищити точність та розширення можливості перевірки шунтів, особливо за малих значень опору резисторів за рахунок отримання високої точності вимірювання опорів, не кратних 10^n .

Виклад основного матеріалу

Сьогодні існує проблема перевірки шунтів зі значенням опорів резисторів, не кратних 10^n . Державний та міждержавні стандарти [6, 7] не дають відповіді щодо можливості перевірки шунта типу Р6, номінальні значення резисторів якого, не кратні 10^n . На рис. 1 показано схему шунта Р6 (непоіменованими цифрами вказані значення опорів резисторів в омах).

Враховуючи те, що клас шунта становить 0,02, то похибка вимірювання опору не повинна перевищувати 0,005 %.

У компенсаційному методі

$$R_x = R_N \cdot \frac{U_{KX}}{U_{KN}}, \quad (1)$$

де R_x , R_N – опори вимірюваного резистора і еталонної міри вимірювальної котушки відповідно; U_{KX} , U_{KN} – спад напруги на вимірюваному резисторі та еталонній мірі вимірювальної котушки, відповідно.

З формули (1) бачимо, що похибка вимірювання опору R_x залежить від похибки міри вимірювальної котушки і потенціометра під час вимірювання спаду напруг U_{KX} , U_{KN} . Похибка міри

вимірювальної котушки становить 0,001 %, потенціометра – 0,001 %, також відбуваються додаткові похибки через вплив контактних термоЕРС.

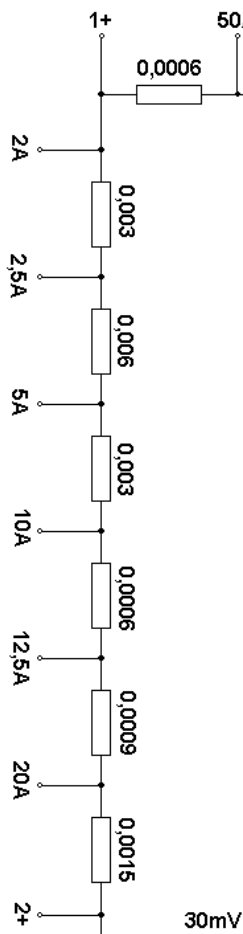


Рис. 1. Схема шунта P6

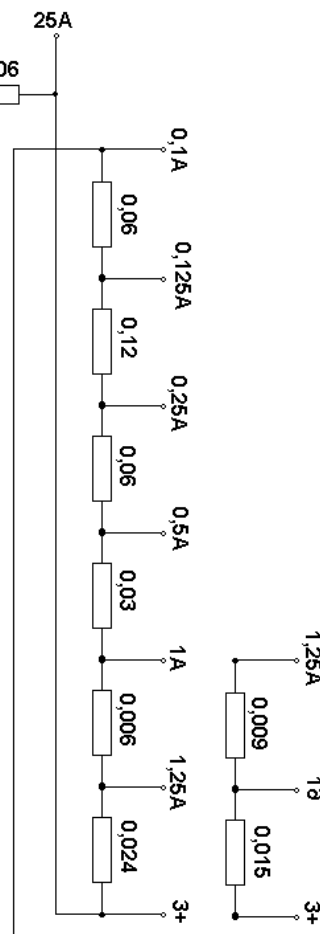


Рис. 2. Виконання резистора 0,024 Ом

Використання для цілей потенціометрів класу 0,001 вимагає зрівноваження 6 або 7 декад, а для усунення впливу термоЕРС на результат вимірювання необхідно проводити два–три вимірювання, тому за такий час вимірювання струм “пливе” [8].

Крім того, у цей час відсутні високостабільні джерела живлення, зокрема струму, номіналом 50 А, стабільність яких не перевищує 0,0005 %.

Для вирішення проблеми метрологічної перевірки шунтів запропоновано мостовий метод вимірювання опору з використанням перехідної міри, який інваріантний до впливу нестабільності джерела живлення на результат вимірювання [8].

Сутність методу полягає у такому. За послідовного з’єднання трьох резисторів R_{01} , R_{12} , R_{23} (рис. 3) їх сумарний опір R_{Σ} визначиться з рівняння (2):

$$R_{\Sigma} = R_{01} + R_{12} + R_{23} \quad (2)$$

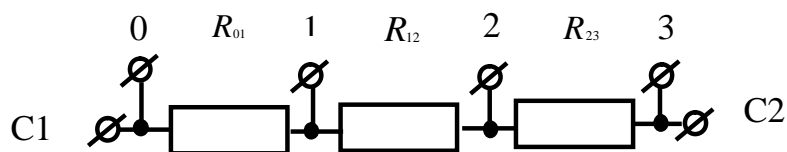


Рис. 3. З’єднання трьох резисторів

Такий опір вимірюють подвійним мостом Томсона, використовуючи метод заміщення [9]. Якщо значення цього опору близьке до значення опору еталонної міри, то похибка вимірювання сумарного опору R_{Σ} буде близькою до похибки міри. Похибка міри опору еталонної міри вимірювальної котушки становить порядку 0,001 %.

Після цього подвійним мостом вимірюють опір резисторів R_{01} , R_{12} , R_{23} та отримують відповідно значення їх опору (рівняння (3), (4), (5)):

$$R_{01} = R_{\text{пор.0-1}} \cdot \frac{R_A}{R_B} + d ; \quad (3)$$

$$R_{12} = R_{\text{пор.1-2}} \cdot \frac{R_A}{R_B} + d ; \quad (4)$$

$$R_{23} = R_{\text{пор.2-3}} \cdot \frac{R_A}{R_B} + d , \quad (5)$$

де R_A , R_B – значення опору плечей відношення моста; $R_{\text{пор.0-1}}$, $R_{\text{пор.1-2}}$, $R_{\text{пор.2-3}}$ – значення опору плечей порівняння; d – додатковий член рівняння під час вимірювання мостом Томсона, нехтуючи малим, тобто $d = 0$.

Розділимо рівняння (3) на (4), а рівняння (4) на (5), і отримаємо такі вирази:

$$\frac{R_{01}}{R_{12}} = \frac{R_{\text{пор.0-1}}}{R_{\text{пор.1-2}}} ; \quad (6)$$

$$\frac{R_{12}}{R_{23}} = \frac{R_{\text{пор.1-2}}}{R_{\text{пор.2-3}}} . \quad (7)$$

З рівнянь (6), (7) визначаємо R_{01} , R_{23} , відповідно:

$$R_{01} = \frac{R_{12} \cdot R_{\text{пор.0-1}}}{R_{\text{пор.1-2}}} ; \quad (8)$$

$$R_{23} = \frac{R_{12} \cdot R_{\text{пор.2-3}}}{R_{\text{пор.1-2}}} . \quad (9)$$

Тепер, використовуючи рівняння (7), (8), подаємо рівняння (1) у такому вигляді:

$$\frac{R_{12} \cdot R_{\text{пор.0-1}}}{R_{\text{пор.1-2}}} + R_{12} + \frac{R_{12} \cdot R_{\text{пор.2-3}}}{R_{\text{пор.1-2}}} = R_{\Sigma} . \quad (10)$$

Після виконання математичних перетворень отримаємо значення опорів резисторів R_{12} , R_{23} :

$$R_{12} \cdot \left(\frac{R_{\text{пор.1-2}} \cdot R_{\text{пор.2-3}}}{R_{\text{пор.1-2}}} + 1 \right) = R_{\Sigma} ;$$

$$R_{12} = \frac{R_{\Sigma}}{\frac{R_{\text{пор.1-2}} \cdot R_{\text{пор.2-3}}}{R_{\text{пор.1-2}}} + 1} ;$$

$$R_{12} = \frac{R_{\Sigma} \cdot R_{\text{пор.1-2}}}{R_{\text{пор.0-1}} + R_{\text{пор.1-2}} + R_{\text{пор.2-3}}} ; \quad (11)$$

$$R_{23} = \frac{R_{\Sigma} \cdot R_{\text{пор.2-3}}}{R_{\text{пор.0-1}} + R_{\text{пор.1-2}} + R_{\text{пор.2-3}}} . \quad (12)$$

За запропонованим методом спочатку виконують перехідну міру зі значеннями опорів резисторів, що номінально дорівнюють опорам резисторів шунта, що перевіряється. Лише один із резисторів, а саме 0,024 Ом (рис. 1), виконаний у вигляді двох послідовно з'єднаних резисторів з номіналами 0,009 і 0,015 Ом з похибкою 0,02 %. Цей варіант виконання резистора 0,024 Ом показано на рис. 2. Для перевірки є додатковий вивід 1 д.

Потім перевіряють перехідну міру, починаючи з резисторів або груп резисторів, кратних 10^n (де n – ціле число або нуль), перевіряються за еталонними мірами вимірювальних котушок опору методом заміщення.

Наприклад, вибирають групу опорів між затискачами 2,5 і 12,5 А (рис. 1), а саме: 0,006, 0,003 і 0,0006 Ом, сума яких становить 0,0096 Ом, і перевіряють за еталонною мірою опору 0,01 Ом методом заміщення.

У мостовому методі вимірювання:

$$R_X = R_N \cdot \frac{R_{\text{пор.}X}}{R_{\text{пор.}N}} = 0,01 \cdot \frac{960}{1000} = 0,01 \cdot \frac{9 \times 100 + 6 \times 10}{9 \times 100 + 10 \times 10} = 0,0096 \text{ Ом}, \quad (13)$$

де $R_{\text{пор.}X} = 960$ Ом, $R_{\text{пор.}N} = 1000$ Ом – значення опорів плеча порівняння під час вимірювання резистора, що перевіряється, і опору еталонної міри.

Вимірювання потрібно проводити, використовуючи “дев’ятки”, тобто, щоб якнайбільша кількість тих котушок плеча порівняння брала участь під час вимірювання опору, що перевіряється, і еталонної міри опорів резисторів.

Розглянемо похибку, що виникає під час використання неповного методу заміщення. Котушки 4×10 підігнані з похибкою, що не перевищує 0,01 %, тобто сумарна абсолютна похибка становить $\Delta R_{\Sigma} = 0,004$ Ом. У цьому випадку сумарна складова відносної похибки, яку вносить плече порівняння під час вимірювання групи опорів між затискачами, 2,5 і 12,5 А, сума яких становить 0,0096 Ом, дорівнює

$$d_{\Sigma R} = \pm \frac{\Delta R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} \cdot 100 \% = \pm \frac{0,004}{960} \cdot 100 \% = \pm 0,00042 \% . \quad (14)$$

Похибка, яку ми розглядаємо, становить 0,00042 %, а якщо взяти значення опору міри вимірювальних котушок за даними результатів перевірки, то похибка може не перевищувати 0,0001 %. Враховуючи, що похибка еталону міри вимірювальної котушки становить 0,001 %, значення похибки для вимірної суми опорів 0,006, 0,003, 0,0006 Ом не перевищує $d_{\Sigma R} = \pm 0,0011$ %.

Потім за допомогою моста вимірюють опір окремих резисторів, що входять у точно вимірну суму, а саме: 0,006, 0,003, 0,0009 Ом. Точніше значення опору кожного номіналу резистора визначають за формулою (9), яку можна подати так:

$$R_{Xn} = R_{\text{пор.}n} \cdot K, \quad (15)$$

де $R_{\text{пор.}n}$ – значення опору плеча порівняння моста під час вимірювання опору n -го резистора;

K – коефіцієнт істиності, причому

$$K = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\text{пор.}1} + R_{\text{пор.}2} + \dots + R_{\text{пор.}n}}, \quad (16)$$

де R_{Σ} – точне значення опору суми резисторів, вимірне методом заміщення; $R_{\text{пор.}1}$, $R_{\text{пор.}2}$, $R_{\text{пор.}n}$ – значення опорів плечей порівняння під час вимірювання опору кожного резистора, що входить у точно вимірну суму.

Опір резисторів 0,0006 Ом між затискачами “+1” і “50 А”, а також між затискачами “50 А” і “25А” перевіряють за наявним значенням опору резистора 0,0006 Ом між затискачами “10А” і “12,5А”

Значення сумарного опору 0,003 Ом між затискачами ”2,5А” і “2А” визначають за значенням 0,003 Ом між затискачами ”5А” і “10А”. Значення сумарного опору 0,003 Ом (0,006+0,009+0,0015) між затискачами “10А” і “2+” визначають за значенням 0,003 Ом між затискачами ”5А” і “10А”.

Потім за допомогою моста вимірюють значення опорів резисторів, що входять у точно вимірну раніше суму, а саме: 0,0006, 0,0009, 0,0015 Ом. Розраховують значення суми (сумуванням) і визначають коефіцієнт істиності для того, щоб одержати точні значення окремих опорів, що входять у суму резисторів, а саме сумарного (0,0006 + 0,0009) Ом між затискачами “10А” і “20А” і 0,0015 Ом – між затискачами “20А” і “2+”.

Маючи раніше вимірний точний опір резистора 0,0006 Ом (між затискачами “10А” і “12,5А”) і точне значення суми опору (0,0006 + 0,0009) Ом розраховують точне значення опору резистора 0,0009 Ом.

Опір резистора 0,006 Ом між затискачами “1А” “1,25А” визначають за знайденим значенням опору резистора 0,006 Ом між затискачами “2,5А” і “5А”. У перехідному періоді резистор 0,024 Ом виконаний із послідовно з’єднаних резисторів з опорами 0,009 і 0,015 Ом з додатковим затискачем “1д”.

Опір резистора 0,009 Ом між затискачами “1,25А” і “1д” визначають за точним значенням суми резисторів (0,006 + 0,003) Ом між затискачами “2,5А” і “10А”.

Опір резистора 0,015 Ом між затискачами “1д” і “3+” визначають за сумарним опором 0,015 Ом між затискачами “2А” і “2+”.

Опір резистора 0,03 Ом між затискачами “0,5А” і “1А” визначають за сумарним опором 0,03 Ом між затискачами “1А” і “3+”.

Опір резистора 0,06 Ом між затискачами “0,25А” і “0,5А” визначають за сумарним опором між затискачами “0,5А” і “3+”.

Опір резистора 0,12 Ом між затискачами “0,125А” і “0,25 А” визначають за сумарним опором 0,12 Ом між затискачами “0,25А” і “3+”.

Опір резистора 0,06 Ом між затискачами “0,1А” і “0,125А” визначають за опором резистора 0,06 Ом між затискачами “0,25А” і “0,5А”.

Маючи точні значення опорів усіх резисторів перехідної міри перевіряють номінально однакові опори резисторів шунта, що перевіряється.

Визначимо відносну похибку вимірювання опору резисторів шунта, використовуючи формулу (15):

$$d_R = \pm (d_k + d_{nop,n}). \quad (17)$$

Відносна похибка визначення коефіцієнта істинності з формули (17) дорівнює

$$d_k = \pm \left[d_{\Sigma R} - \left(\frac{R_{nop.1}}{R_{nop.1} + R_{nop.2} + R_{nop.3}} \cdot d_{кв.ноп.1} + \frac{R_{nop.2}}{R_{nop.1} + R_{nop.2} + R_{nop.3}} \cdot d_{кв.ноп.2} + \frac{R_{nop.3}}{R_{nop.1} + R_{nop.2} + R_{nop.3}} \cdot d_{кв.ноп.3} \right) \right], \quad (18)$$

де $d_{кв.ноп.1}, d_{кв.ноп.2}, d_{кв.ноп.3}$, – відносні похибки значень $R_{nop.1}, R_{nop.2}, R_{nop.3}$ визначаються похибками квантування, що дорівнюють порядку 0,0001 %.

Враховуючи ці міркування, можна зробити висновок, що граничне значення відносної похибки коефіцієнта істинності дорівнює

$$d_{к.сп.} = \pm |d_{\Sigma R} + 3 \cdot d_{кв.ноп.}| = \pm |0,001 + 3 \cdot 0,0001| = \pm 0,0013 \text{ \%}.$$

Якщо взяти значення опору плеча порівняння моста $R_{nop,n}$ за даними результатів перевірки, то його похибка може не перевищувати 0,003 %, звідси граничне значення відносної похибки вимірювання опору резистора, що входить у точну вимірну суму згідно з (17), і дорівнює

$$d_{R.сп.} = \pm |d_{к.сп.} + d_{R.ноп.}| = \pm |0,0013 + 0,003| = \pm 0,0043 \text{ \%},$$

що не перевищує 0,005 %.

Висновки

Зпропонований метод забезпечує похибку вимірювання опору на рівні 0,005 % для резисторів номіналом, не кратним 10^n , крім того, дає змогу виконувати перевірку шунтів за методикою, запропонованою у [8], і вирішити проблему, яка не охоплена міжнародними

стандартами [6, 7] через відсутність необхідних технічних рішень. Використання запропонованого алгоритму вимірювання електричного опору дасть змогу створювати засоби та вузли виміральної техніки вищої точності, зокрема, для мікроелектроніки.

1. Стадник Б., Луцук Я., Степаняк М. Метрологічне забезпечення та метод визначення температурних характеристик кристалооптичних перетворювачів: тези доп. 8-ї Міжнар. конф. "Температура-2003". – Львів, 2003. – С. 100. 2. Дорожовець М. М., Івахів О. В., Мокрицький В. О. Уніфіковані перетворювачі інформаційного забезпечення мехатронних систем: навч. посіб. – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2009. – 304 с. 3. Степаняк М. В., Степаняк Мик. М. Підвищення точності вимірювання електричного опору в технологічних процесах // Комп'ютерні технології друкарства. – Львів, 2010. – № 24. – С. 188–193. 4. Кочан Р. В. Прецизійні аналого-цифрові перетворювачі з безмонтажною метрологічною самоперевіркою: моногр. – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2012. – 212 с. 5. Патент на винахід № 82855 (Україна) МПК(2006) G 01R 27/00, G 01R 17/00. Спосіб вимірювання електричного опору / Степаняк М. В. – 26.05.2008, Бюл. № 10. 6. Преобразователи измерительные электрических величин. Шунты постоянного тока измерительные. Методика поверки. МИ 1991-89. – Гос. комитет СССР по стандартам, 1991. 7. ГОСТ 8042-93 (МЭК 51-8-84). Приборы аналоговые, показывающие электроизмерители прямого действия и вспомогательные части к ним. Ч. 8: Шунты и добавочные резисторы // Межгосударственный стандарт. – Минск, 1993. 8. Авторское свидетельство (СССР) №1529131, МКИ G 01 R 17/00. Способ поверки шунтов // Д. Е. Марунчак, Л. В. Заничковская, В. А. Кочан, М. В. Степаняк. – 15.12.89. Бюл. 46. 9. Дорожовець М. та ін. Основи метрології та виміральної техніки: підруч.: у 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковалик; за ред. Б. Стадника. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005. – Т. 2: Виміральної техніка. – 656 с.